



TITLE:

Disorder-induced quantum phenomena in inhomogeneous optical lattices(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Sakaida, Masaru

CITATION:

Sakaida, Masaru. Disorder-induced quantum phenomena in inhomogeneous optical lattices. 京都大学, 2016, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19476>

RIGHT:

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	阪井田 賢
論文題目	Disorder-induced quantum phenomena in inhomogeneous optical lattices (空間的に非一様な光格子系における乱れによって誘起される量子現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>空間的な非一様性を含んだ系において乱れが引き起こす量子現象は、現在まで50年以上もの間研究され続けている問題であり、固体中で観測される現象に対しては既に多くの理解が得られている。近年、冷却原子系において空間的な乱れを含んだ光格子系が実現され、この系においては固体を用いた実験では調べることが困難であった「空間的な乱れが非常に強い領域における量子現象」を実験的に研究することが可能となった。それゆえこの系の実現により、固体物理の分野において構築された枠組みを超えた理論を展開することが求められている。加えて、多成分原子系やボーズ・フェルミ混合系に代表される新奇な量子相における空間的非一様性の影響も、光格子系において取り扱いが可能となっている。しかしながら、この系に対する理論解析は未だ行われておらず、理論の整備が急務となっている。</p> <p>このような背景の下、本論文では空間的に乱れた2成分及び多成分引力フェルミ粒子系に焦点を当て、空間的な非一様性と粒子間相互作用が織り成す量子現象の解析を行っている。まず、2成分系に関する解析では、統計手法を援用した動的平均場理論を引力フェルミ系に適用できるように拡張し、定量的に信頼できる基底状態の相図を決定している。そして、この結果を先行研究と比較し、統計手法を援用した動的平均場理論の引力フェルミ系に対する有用性を明らかにしている。また、乱れが強い領域においては、クーパーペア絶縁体相からアンダーソン絶縁体相へ連続的に移行するということを指摘している。さらに様々な種類の乱れに関する解析を行い、それらの系統的な比較から、引力相互作用が空間的な非一様性の効果を強め、二元合金型の乱れによるバンド分裂の作用も強めることを明らかにしている。</p> <p>2成分系の解析で得られた知見に基づき、空間的に乱れた3成分フェルミ原子系の解析を行っている。乱れがない多成分原子系の基底状態として密度波相が安定化するということが知られているが、乱れがこの密度波相の秩序を破壊し、乱れの弱い領域においては超流動相を基底状態として安定化させることを明らかにしている。また、さらに乱れが強い領域においては、超流動相からアンダーソン絶縁体相への転移が空間的な乱れによって誘発されるということを数値的に示している。これらの結果から絶対零度における系の相図を決定し、前述の二つの転移が起こる相転移点が引力相互作用の増大にともなって単調に増加するということを指摘するとともに、これらの転移が共に一次転移であることを明らかにしている。</p> <p>さらに研究を進め、空間的に乱れた4成分フェルミ原子系の解析を行い、この系においては超流動相が基底状態として安定化する領域が存在しないことを示し、乱れによって密度波相からアンダーソン絶縁体相への直接の転移を引き起こされることを明らかにしている。また、3成分系と4成分系における相転移の違いが、超流動秩序によるエネルギーの利得に起因することを明らかにし、4成分系の相転移現象がより成分数が多い系においても観測できるということを指摘している。さらに、転移点において一粒子励起スペクトルのギャップが閉じるということを数値的に示し、この転移が二次転移であるということを明らかにしている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、空間的な非一様性を含んだ光格子系が、凝縮系物理における新たな研究テーマを提供している。この系の特長として、非常に強い乱れを含んだ状態を実現することができ、また、固体では実現しにくい多成分の量子凝縮相に対する乱れの影響を実験的に調べることで可能であるという点が挙げられる。これらの特長により、乱れた光格子系は固体では観測されなかった新しい量子現象を実現する舞台として期待されており、この系の性質の解明が重要な課題となっている。このような背景の下、阪井田氏は動的平均場理論等を駆使し、空間的な乱れを含んだSU(N)引力フェルミ粒子系の超流動を対象とした信頼性の高い理論研究を行った。

まず、SU(2)引力フェルミ粒子系においては、空間的な乱れによって引き起こされる超流動-クーパーペア転移の性質に関して定量的に信頼できる結果を示し、「統計的手法を援用した動的平均場理論」が引力系においても有用な解析手法であるということを示している。また、アンダーソン絶縁体のオーダーパラメータを計算し、クーパーペア絶縁体相からアンダーソン絶縁体相へのクロスオーバーを明らかにするとともに、引力相互作用が粒子の局在の効果を増幅することを定量的に示している。これらの研究は、空間的な乱れの作用と粒子間相互作用を共に非摂動的に取り扱い、定量的に信頼できる結果を得ているという点においても高く評価される。

SU(3)引力フェルミ粒子系の解析では、2成分系においては観測されていなかった密度波相-超流動相の転移が空間的な非一様性によって引き起こされるということを初めて明らかにしている。また、この転移の性質を調べるために状態密度と局所粒子数密度の分布を計算し、その結果、転移点においてフェルミ面のギャップが閉じ、局所粒子数密度の分布が二こぶの分布から一つのピークを持つ分布に変化することを示している。また、空間的な非一様性が転移点において超流動秩序を破壊し、アンダーソン絶縁体相を安定化させるということを示している。多成分系における乱れの効果は先行研究においては議論されていないものであり、上述の成果は阪井田氏のオリジナルな成果として高く評価される。

また、空間的に乱れたSU(4)引力フェルミ粒子系を対象とした解析も行い、この系においては密度波相からアンダーソン絶縁体相への直接転移という、SU(3)系とは異なる転移が乱れによって誘起されることを明らかにしている。さらに、これらの相転移現象の違いには、乱れに対する密度波秩序の強固さと超流動秩序によるエネルギーの利得が重要な役割を演じていることを見出している。その結果、より成分数が多い系においても密度波相-アンダーソン絶縁体相転移が観測される可能性を指摘している。現在、冷却原子分野ではSU(6)系やSU(10)系などの成分数が非常に大きな系が注目を集めており、本研究の成果はこのような実験的観点からも興味深い。

このように、本論文は引力フェルミ粒子系に空間的な非一様性が及ぼす影響を明らかにしたものであり、空間的に乱れたフェルミ系の解析の基礎となるものである。博士論文公聴会においても、阪井田氏は入念に準備された発表を行い、質疑応答にも丁寧に答え、高い学識を有していることをアピールした。以上の事より、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものである。平成28年1月14日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。